

전류 경로 보상을 이용한 높은 격리도를 갖는 마이크로스트립 방향성 결합기 설계

Design of Microstrip Directional Couplers with High Isolation Using Current Detour

김 성 진 · 하 진 혁* · 이 문 규

Seong-Jin Kim · Jin-Hyuk Ha* · Moon-Que Lee

요 약

본 논문에서는 U-NII-3 대역(5.725~5.850 GHz)에서 우모드(even-mode)와 기모드(odd-mode)간의 위상속도 차를 전류 경로 보상을 통해 보정한 높은 방향성을 갖는 마이크로스트립 방향성 결합기 구조를 제안한다. 본 연구에서 제안한 방법은 위상속도가 상대적으로 큰 기모드에서 전류 경로의 길이를 더 길게 설계하여 각 모드 간 위상 정합을 달성하는 방법을 적용하였다. 제안한 방법은 삼각에지를 결합 지점 양 끝에 부착하는 구조와 결합 영역에 원형 슬롯을 추가하는 구조의 두 가지 구조로 검증하였다. 측정결과, 제안한 마이크로스트립 방향성 결합기는 38.6 dB 이상, 46.0 dB의 격리도와 25.7 dB 이상, 29.7 dB의 방향성을 갖는다. 기존 마이크로스트립 방향성 결합기와 비교하여 방향성은 10.8 dB 이상, 14.8 dB의 개선된 결과를 보였다.

Abstract

This paper proposes new microstrip directional couplers with high directivity using current path detour to compensate for unequal even- and odd-mode phase velocities in the U-NII upper band (5.725~5.850 GHz). The proposed method involves matching the phase velocities of even and odd modes by designing a longer current path for the odd mode, whose phase velocity is faster than that of the even mode. The proposed idea is demonstrated by the design of two directional couplers: one is a directional coupler with triangular edges on each side of the coupling area, and the other is a coupler with circular patterns in the coupling gap. The measurement results of the proposed two directional couplers exhibited an isolation of more than 38.6 dB and 46.0 dB, respectively, and a directivity of more than 25.7 dB and 29.7 dB, respectively. Compared to the conventional structures, the directivity of the proposed structures was enhanced by more than 10.8 dB and 14.8 dB, respectively.

Key words: Directivity, Microstrip Line, Directional Coupler, Even/Odd Mode, U-Nii Upper Band

I. 서 론

방향성 결합기는 두 개의 전송선로가 서로 가까이 있

「이 연구는 2019학년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 연구되었음.」

서울시립대학교 전기전자컴퓨터공학과(School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

*한화시스템(주)(Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received August 4, 2020 ; Revised August 24, 2020 ; Accepted October 15, 2020. (ID No. 20200804-067)

· Corresponding Author: Moon-Que Lee (e-mail: mqlee@uos.ac.kr)

을 때, 전송선로들 간의 전자기적 상호작용으로 방향성을 갖는 수동 소자다. 이러한 방향성 결합기는 신호를 검출이나 동일 주파수 대역에서 입출력 신호 분리 등 다양한 RF 회로와 시스템에 기본구조로 이용된다. 결합기는 주로 유전체 안에서 구현되는 스트립선로 결합, 동축케이블 간 결합, 마이크로스트립선로 결합 등 다양한 형태로 구현된다^[1]. 스트립라인과 동축케이블의 경우, 전자계가 전송 모드와 무관하게 균일한 유전체 안에 분포되어 있어서 TEM 모드로 작동될 수 있다. 하지만 마이크로스트립 선로의 경우, 전자계가 유전체 기판과 유전체 위의 공기에 분포되어 TM-TE 모드의 복합된 파가 형성된다. 또한, 공기와 유전체의 이중 매질에서 결합선로의 전송 모드에 따른 유효 유전율이 달라져 방향성(directionality) 특성이 악화된다^[2]. 본 논문에서는 마이크로스트립 결합기에서 발생될 수 있는 방향성 악화를 개선하기 위한 방법으로 레이아웃 패턴을 이용한 전류 경로를 조정하는 구조를 제안하고 특성을 검증하고자 한다.

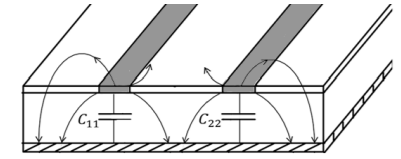
II. 결합 마이크로스트립의 유효 유전율

마이크로스트립 방향성 결합기는 대칭구조로 우(even) 모드/ 기(odd)-모드 분석을 통해 해석될 수 있다. 그림 1은 결합선로에서 우모드와 기모드의 전기장 분포 및 커패시턴스 등가 모델이다. 그림 1(a)에서 우모드 전류는 각 도체의 바깥쪽 단면을 통해 주로 흐르는 반면, 그림 1(b)의 기모드의 전류는 결합 지점에 가까운 도체 안쪽으로 흐르는 경향이 있다. 또한 우모드의 전기장은 일반적으로 공기 쪽으로의 분포 비율이 기모드의 분포 비율보다 더 적다. 따라서 우모드의 유효 유전율(ϵ_{eff})이 더 크게 나타나고, 식 (1)과 식 (2)에 의해 기모드의 위상속도는 우모드보다 더 커진다^[2].

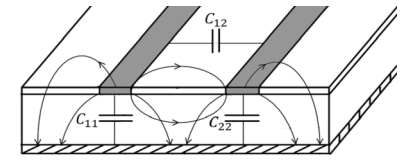
$$\beta_{(Quasi-TEM)} = \omega \sqrt{\mu \epsilon_{eff}} \quad (1)$$

$$v_{p(Quasi-TEM)} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

이를 입증하기 위해 Keysight 사의 ADS를 이용하여 5.8 GHz에서 마이크로스트립 결합선로의 우모드와 기모드의 특성 임피던스와 유효 유전율(ϵ_{eff})을 먼저 계산하였다.



(a) 우모드의 전기장 분포 및 등가 모델
(a) In even-mode



(b) 기모드의 전기장 분포 및 등가 모델
(b) In odd-mode.

그림 1. 결합선로에서 우모드/ 기모드의 전기장 분포 및 커패시턴스 등가 모델

Fig. 1. Electric field distribution and capacitance equivalent model in coupled line.

그림 2는 결합선로의 우모드와 기모드를 단락 및 개방 시킨 회로이고, 관심 주파수에서 선로의 길이는 파장의 1/4배 근처이다.

$$Z_o = \sqrt{Z_{short} Z_{open}} \quad (3)$$

$$\beta l = \frac{\pi}{2} \pm n\pi \quad (4)$$

$$v_p = f\lambda \quad (5)$$

우모드와 기모드에 대해 각각 종단을 개방과 단락을 하여 식 (3)으로부터 특성 임피던스를 구하고, 입력 이미턴스(immittance)로부터 각 모드의 유효 유전율을 구할 수 있다. FR4(상대 유전율: 4.4, 두께: 0.8 mm, $\tan \delta$: 0.02) 기판에 13.0 dB 결합계수를 갖도록 초기 설계한 결합 마이

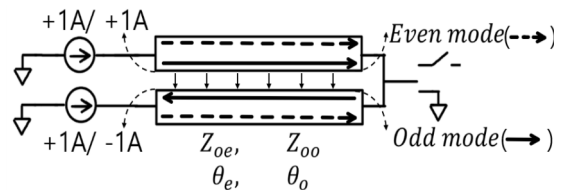
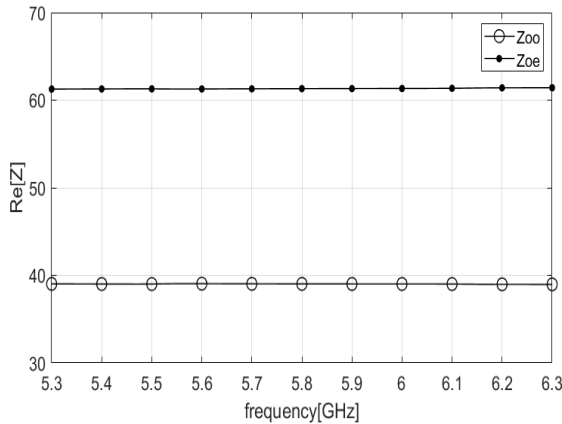


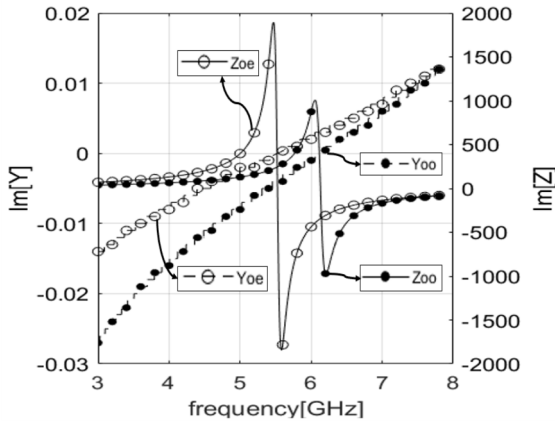
그림 2. 우모드/ 기모드에서 결합선로의 단락/ 개방 회로
Fig. 2. Short- and open-circuit of coupled lines in even- and odd- mode.

크로스스트립의 선폭 $W=1.46$ mm, 선폭간 간격 $S=0.3$ mm, 길이 $L=7.1$ mm에 대한 그림 2의 우모드와 기모드에서 단락/개방에 대한 EM 모의시험을 수행하였다.

식 (3)으로부터 구한 우모드와 기모드의 임피던스는 각각 39 Ω , 61 Ω 로 계산되었다. 이는 그림 3(a)에서 표시하고 있다. 그림 1에서 모드 간 전기장 분포 차이와 유효 유전율 차에 의해 커패시턴스가 달라지고, 특성 임피던스는 차이가 난다는 것을 알 수 있다.



(a) 특성 임피던스 모의실험 결과
(a) Simulated result of characteristic impedance



(b) 이미턴스 모의실험 결과
(b) Simulated result of immittance

그림 3. 결합선로에서 우모드와 기모드의 특성 임피던스와 이미턴스 모의실험 결과

Fig. 3. Simulated result of characteristic impedance and immittance of even- and odd-mode in coupled lines.

그림 3(b)는 그림 2에서 두 모드의 결합선로를 단락시켰을 때 측정되는 입력 이미턴스(immittance) 그래프를 나타낸다. 입력 이미턴스가 종단 이미턴스의 역수값을 취하기 마이크로스트립의 길이(L)를 파장의 1/4배인 7.1 mm로 설정하였다. 입력 임피던스와 어드미턴스가 ∞ , 0이 되는 주파수에서 두 모드에서 실제 파장의 1/4배를 뜻한다. 따라서 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 유효 유전율을 구할 수 있다. EM 모의시험 결과, 우모드에서 5.53 GHz, 기모드에서 6.14 GHz이다. 따라서 두 모드의 유효 유전율은 각각 $\epsilon_{eff}^e=3.649$, $\epsilon_{eff}^o=2.960$ 이다. 그러므로 기모드의 위상속도가 우모드보다 더 큰 것이 입증될 수 있다.

악화된 방향성을 개선하기 위해 다양한 구조들이 소개된다. 모드 간 위상속도 차를 집중소자 개념의 커패시턴스의 특성을 이용하여 방향성을 개선한 구조^{[3][4]}, 결합기를 계단형의 다중 구조로 나눠 위상속도 차를 보상한 구조^[5], 모드 간 다른 위상속도와 전류 경로의 위치를 통해 기모드에서 전류 경로 길이를 길게 설계하여 위상 정합을 달성하기 위한 Wiggly 선로를 이용한 구조^[6]가 발표되어 왔다.

본 연구에서는 모드간 전류 경로가 다름에 착안하여 기존의 발표되어 왔던 구조의 설계 방식보다 간단하게 모드 간 전파속도 차를 경로길이로 보상하는 구조를 제안한다.

III. 마이크로스트립 방향성 결합기 설계

본 논문에서는 우모드와 기모드 간의 위상 보상을 위한 두 가지 방법을 제안한다. 첫째, 결합 지점 양 끝에 삼각에지(triangular edge)를 부착한다. 따라서 기모드의 전류는 우모드의 전류 경로에 비해 더 긴 경로를 지나게 된다. 두 번째 방법으로 결합 면에 적당한 크기의 원형슬롯(circular slot)을 추가하여 기모드 전류의 경로차를 늘려준다.

제안한 구조의 격리도와 방향성 개선 특성을 확인하기 위해 U-NII Upper 대역(5.725~5.850 GHz)에서 FR4(상대 유전율: 4.4, 두께: 0.8 mm, $\tan \delta$: 0.02) 기판을 이용하여 결합계수가 13.0 dB인 마이크로스트립 방향성 결합기를 설계하였다.

3-1 구조1: 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기

제안한 구조를 검증 및 성능 비교를 위해 기존 방식의 마이크로스트립 방향성 결합기를 먼저 설계하였다. 그림 4는 설계한 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기의 레이아웃과 두 모드의 전류 경로를 보여준다.

결합 선로의 너비와 길이는 W_1 , L_1 이고, 결합 선로와 포트 사이를 이어주는 전송 선로의 너비와 길이는 W_2 , L_2 이다. 또한, 결합 선로 사이 간격은 S 이다. 표 1은 설계한 일반구조 마이크로스트립 방향성 결합기의 물리적 치수를 나타낸다.

3-2 구조2: 삼각에지를 이용한 위상 보상

그림 5는 우모드와 기모드 간의 위상을 보상하기 위해 결합 지점 양 끝에 삼각에지(triangular edge)를 부착한 구조의 레이아웃과 두 모드의 전류 경로를 보여준다. 기본

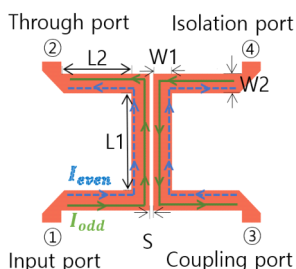


그림 4. 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기의 레이아웃과 우모드와 기모드의 전류 경로

Fig. 4. Layout of conventional microstrip directional coupler and current paths of even- and odd- mode.

표 1. 일반구조 마이크로스트립 방향성 결합기의 물리적 치수

Table 1. Geometrical parameters of conventional microstrip directional couplers.

Parameters	Value (mm)
W_1	1.46
W_2	1.52
L_1	7.33
L_2	5.35
S	0.30

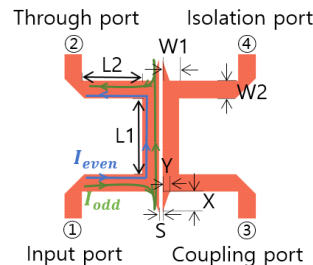


그림 5. 삼각에지(triangular edge)를 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기 레이아웃과 우모드와 기모드의 전류 경로

Fig. 5. Layout of proposed directional coupler using triangular edge and current paths of even- and odd-mode.

표 2. 삼각에지(triangular edge)를 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기의 물리적 치수

Table 2. Geometrical parameters of proposed directional coupler using triangular edge.

Parameters	Value (mm)
W_1	1.46
W_2	1.52
L_1	6.55
L_2	4.90
S	0.30
X	3.17
Y	0.88

적인 설계 사양은 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기와 같다. 또한, 삼각에지의 수평 길이는 X , 높이는 Y 이다. 표 2는 삼각에지를 이용한 방향성 결합기의 물리적 치수를 나타낸다.

3-3 구조3: 원형슬롯을 이용한 위상 보상

그림 6은 원형슬롯(circular slot)을 통해 기모드의 전류 경로를 연장하는 구조의 레이아웃과 두 모드의 전류 경로를 보여준다. 기본적인 설계 사양은 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기와 같다. 또한, 원형 패턴에서 내부 원의 직경은 R_1 , 외부 원의 직경은 R_2 이다. 표 3는 원형슬롯을 이용한 방향성 결합기의 물리적 치수를 나타낸다.

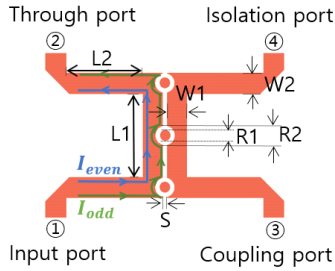


그림 6. 원형슬롯(circular slot)을 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기 레이아웃과 우모드와 기모드의 전류 경로

Fig. 6. Layout of proposed directional coupler using circular patterns and current paths of even- and odd-mode.

표 3. 원형슬롯(circular slot)을 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기의 물리적 치수

Table 3. Geometrical parameters of proposed directional coupler using circular patterns.

Parameters	Value (mm)
W_1	1.46
W_2	1.52
L_1	5.98
L_2	5.35
S	0.30
R_1	0.80
R_2	1.40

그림 7은 설계한 3종류의 마이크로스트립 방향성 결합기의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 기준을 위한 일반 마이크로스트립 방향성 결합기인 구조 1은 U-NII-3 대역에서 13.0 dB, 격리도는 31.5 dB로 방향성은 18.5 dB이다. 삼각에지를 이용하여 우모드와 기모드의 위상차를 보상하는 구조 2는 U-NII-3 대역에서 결합 계수는 12.8 dB, 격리도는 42.5 dB 이상으로 방향성은 29.3 dB 이상의 우수한 특성을 보였다. 기준 구조 1과 비교하여 구조 2의 방향성은 10.8 dB 이상 향상되었다. 원형슬롯을 통해 기모드의 전류 경로를 연장하는 구조 3은 U-NII-3 대역에서 결합 계수는 15.3 dB, 격리도는 46.7 dB 이상으로 방향성은 31.5 dB 이상으로 측정되었다. 이 특성은 기준이 되는 구

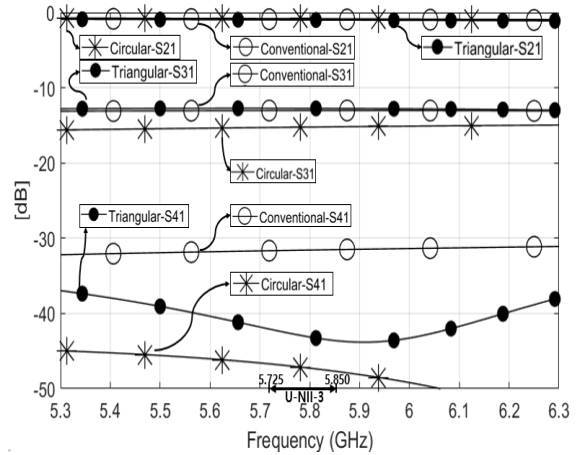


그림 7. 마이크로스트립 방향성 결합기의 모의실험 결과
Fig. 7. EM-simulated results of the microstrip directional couplers.

조 1과 비교하여 방향성은 13.0 dB 이상 향상된 결과다.

IV. 제작 및 측정결과

그림 8은 FR4기판으로 제작한 3종의 마이크로스트립 방향성 결합기를 보여준다.

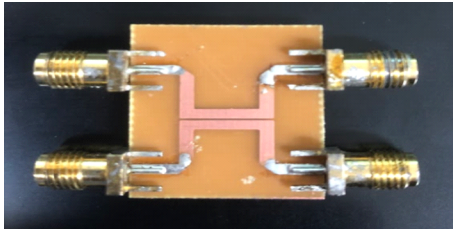
그림 9는 제작한 마이크로스트립 방향성 결합기의 측정결과를 나타내는 그래프이다. 측정결과, U-NII-3 대역에서 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기의 결합 계수는 13.3 dB, 격리도는 28.2 dB로 방향성은 14.9 dB이다.

삼각에지를 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기의 결합계수는 12.9 dB 이상, 격리도는 37.7 dB 이상으로 방향성은 24.8 dB 이상이며, 보상 전에 비해 10.1 dB 이상 향상되었다.

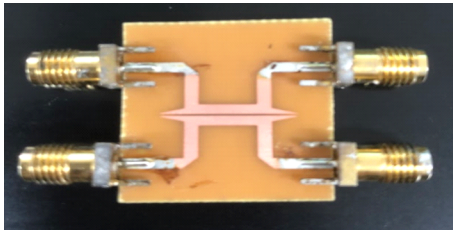
원형슬롯을 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기의 결합 계수는 16.3 dB, 격리도는 46.0 dB로 방향성은 29.7 dB이며, 보상 전에 비해 14.8 dB 향상되었다.

그림 10은 모의실험 결과와 측정결과와의 방향성을 비교한 그래프이다. U-NII-3 대역에서 방향성이 구조 2에서 최대 4.5 dB, 구조 3에서 최대 1.8 dB의 차이를 보이지만 유사한 주파수 특성 그래프를 확인할 수 있다.

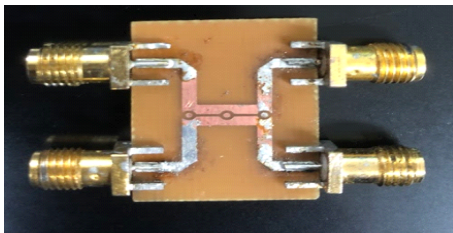
제안된 두 가지 방법 모두 출력 방향성 특성에 대한 주파수 응답이 향상된 것을 확인할 수 있다. 표 4는 5.8 GHz



(a) 일반적인 마이크로스트립 방향성 결합기
(a) Conventional microstrip directional coupler



(b) 삼각에지를 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기
(b) Microstrip directional coupler using triangular edges



(c) 원형슬롯을 이용한 마이크로스트립 방향성 결합기
(c) Microstrip directional coupler using circular hole patterns

그림 8. 제작한 마이크로스트립 방향성 결합기
Fig. 8. Fabricated microstrip directional coupler.

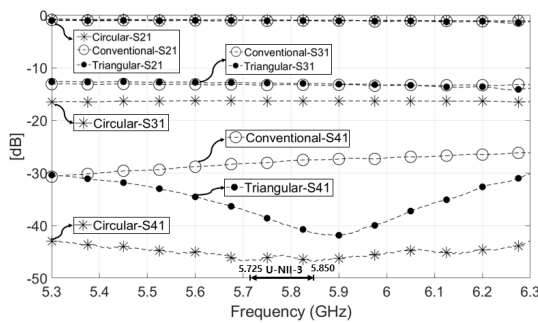


그림 9. 제작한 마이크로스트립 방향성 결합기의 측정 결과
Fig. 9. Measured results of the fabricated microstrip directional couplers.

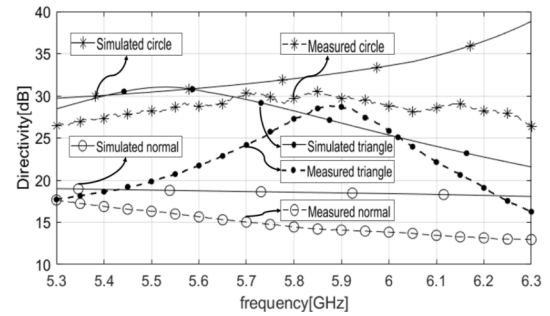


그림 10. 마이크로스트립 방향성 결합기의 모의실험 결과와 측정 결과
Fig. 10. EM-simulated and measured results of the microstrip directional couplers.

표 4. 일반적인 구조와 제안된 구조의 성능 요약

Table 4. Summary of the performances of the proposed and conventional structure.

	f (GHz)	I.L (dB)	Coupling (dB)	Isolation (dB)	Directivity (dB)
Conventional	5.8	1.1	13.3	27.7	14.4
Triangular edge		1.1	13.0	40.2	27.2
Circular slot		0.9	16.3	46.0	29.7

에서의 마이크로스트립 방향성 결합기의 특성을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 U-NII-3 대역(5.725~5.850 GHz)에서 낮은 방향성을 개선한 마이크로스트립 방향성 결합기를 설계하였다. 모드 간 전류 경로가 차이가 남을 보이고, 모드 간 위상 속도의 차이를 전류 경로로 보상하는 두 가지 구조를 제안하여 방향성 결합기의 방향성 특성을 개선하였다. 제안한 구조는 마이크로스트립 형태로 구성되어 쉽게 제작이 가능하여 다양한 RF 회로와 시스템에 기본구조로 사용이 가능할 것으로 생각된다.

References

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken,

- NJ, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed. Wokingham, Addison-Wesley, 1989.
- [3] C. S. Kim, J. S. Lim, D. J. Kim, and D. Ahn, "A design of microstrip directional coupler with the improved directivity characteristic," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 6, pp. 548-553, 2004.
- [4] M. Dydyk, "Accurate design of microstrip directional couplers with capacitive compensation," in *IEEE MTT-S*

- Digest on Microwave Symposium*, Dallas, TX, May 1990, vol. 1, pp. 581-584.
- [5] J. Müller, C. Friesicke, and A. F. Jacob, "Stepped impedance microstrip couplers with improved directivity," in *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, Jun. 2009, pp. 621-624.
- [6] A. Podell, "A high directivity microstrip coupler technique," in *G-MTT 1970 International Microwave Symposium*, Newport Beach, CA, May 1970, pp. 33-36.

김 성 진 [서울시립대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1682-9361>



2020년 8월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2020년 9월~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학부 석사과정
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템

이 문 규 [서울시립대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2231-8509>



1992년: 한국과학기술원 전기및전자학과 (공학사)
1994년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1999년~2002년: 한국전자통신연구원 위성탑재부품팀 선임연구원
2015년 11월~2018년 2월: 과학기술정보통신부 전파위성 PM/CP
2002년~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이더/센싱, 무선통신시스템 등

하 진 혁 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0008-2910>



2006년: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 8월~현재: 한화시스템 전문연구원
[주 관심분야] 광대역 송수신 시스템, 레이다 주파수합성기, 레이다 시스템